



**Коммерциялық емес
акционерлік қоғам**

**ҒҰМАРБЕК ДӘУКЕЕВ
АТЫНДАҒЫ АЛМАТЫ
ЭНЕРГЕТИКА ЖӘНЕ
БАЙЛАНЫС
УНИВЕРСИТЕТІ**

Жылу энергетика және
физика кафедрасы

**Техникалық термодинамика.
Жылуқуштік айналымдарды және термодинамикалық
құбылыстарды есептеу**

6B07103 - Жылуэнергетика мамандықтарының барлық оқу түрлерінің
студенттері үшін есептік-сызба жұмыстарын орындауға арналған
әдістемелік нұсқау

Алматы 2025

ҚҰРАСТЫРУШЫЛАР: Р.А.Мусабеков, В.О.Байбекова.
Жылутехникасының теориялық негіздері. 6B07103 – Жылуэнергетика мамандықтарының барлық оқу түрлерінің студенттері үшін есептік-сызба жұмыстарын орындауға арналған әдістемелік нұсқаулар. – Алматы: Ғұмарбек Дәукеев атындағы АЭЖБУ КеАҚ, 2025. – 38 б.

Әдістемелік нұсқау «Техникалық термодинамика» курсы бойынша есептік сызба жұмыстарды орындаудың тапсырма нұсқалары мен шешу жолдарынан және курс бағдарламаларынан тұрады.

Әдістемелік нұсқаулар 6B07103 - Жылуэнергетика мамандықтарының барлық оқу түрлерінің студенттеріне арналған.

Без. 10, әдеб.көрсеткіші.- 7 атау.

Пікір беруші: ЖЭЖФ каф. проф., PhD

С.Қ.Абильдинова

«Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамының 2025ж.негізгі баспа жоспары бойынша басылады.

© «Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті» КЕАҚ, 2025ж.

Мазмұны

1	Жалпы әдістемелік нұсқаулар	4
2	Шартты белгілеулер	5
3	№1 есепті-сызба жұмыс. Су және су буындағы жылуқозғалымдық құбылыстар	12
4	№2 есепті-сызба жұмыс. Жылуөткізгіштік пен жылуөту	18
5	№3 есепті-сызба жұмыс. Жылу электр станцияларының тиімділігі	23
6	№4 есепті-сызба жұмыс. Жылу электр станцияларының тиімділігі	31
	Әдебиеттер тізімі	38

1. Жалпы әдістемелік нұсқаулар

Әдістемелік нұсқау техникалық термодинамиканың: қоспалар мен идеал газ құбылыстарын, су және су буындағы термодинамикалық құбылыстарды және Ренкин айналымы бойынша істейтін букүштік қондырғыны өздігінен оқып үйренуіне арналған құрал. Құрал осы бөлімдер бойынша есептік-сызба жұмыстарды орындау үшін нұсқаулардан, негізгі кейіптемелерден , жұмысқа қойылған талаптардан және келтірілген мысал нұсқаны шешу жолдарынан тұрады.

Жұмысты орындамас бұрын ұсынылған әдебиеттерді қарастырып, есептердің шешу алгоритмін құрастыру, негізгі кейіптемелерді жаза отырып, қабылданған шамалардың шартты белгілерін қолданып, жалпы түрде шешім шығару қажет.

СИ жүйесінің бірліктерін қолдана отырып алынған нәтижелерді кесте түрінде көрсетіп және p, v ; $T-s$; $h-s$ - координаталар бойынша сызбалар тұрғызылуы қажет.

Орындалған жұмыс мазмұнында толық тапсырмалар, компьютерлік есептеу бағдарламаларының блок-схемасы, алгоритмі (құрастырылған блок-схема бойынша калькулятормен есептеуге болады), алынған нәтиженің қорытындысы, қолданылған әдебиеттер тізімі болу керек [1].

2. Шартты белгілеулер

A – Гельмгольц энергиясы (изохоралы-изотермиялық потенциал, бос энергия);

a – меншікті изохоралы-изотермиялық потенциал, дыбыс жылдамдығы;

B – атмосфералық қысым, отын шығыны;

b – меншікті отын шығыны;

C – жылусыйымдылық;

C_x – термодинамикалық құбылыстардағы жылусыйымдылық;

c – меншікті жылусыйымдылық, жарық жылдамдығы;

$\tilde{n}$ – молярлық жылусыйымдылық;

c – көлемдік жылусыйымдылық;

D – су, бу шығыны;

d – ылғалды ауадағы ылғал мөлшері; шығырдағы меншікті бу шығын;

E – кинетикалық немесе потенциалдық энергия, түрленуі;

e – меншікті түрлену;

F – күш;

f – аудан;

G – Гиббс энергиясы (изохоралы-изотермиялық потенциал);

g – еркін түсу үдеуі, меншікті Гиббс энергиясы;

H – энтальпия;

h – меншікті энтальпия; Планк тұрақтысы;

k – адиабата көрсеткіші, Больцман тұрақтысы;

L – жұмыс;

l – меншікті жұмыс;

M_r – салыстырмалы молекулалық маңыз;

M – молярлық маңыз (бір мольдік маңыз);

m – маңыздық шығын;

m – маңыз, айналым еселігі;

N – қуат, жиілік саны;

N_A – Авагадро тұрақтысы;

n – зат мөлшері, мольдер саны, политропа көрсеткіші;

P – дене салмағы;

p – қысым;

Q – жылу;

R – меншікті газ тұрақтысы;

$\tilde{R}$ – универсал (молярлық) газ тұрақтысы;

r – булану жылуы (бу түзілетін жылу);

S – энтропия;

s – меншікті энтропия;

$\tilde{S}$ – молярлық энтропия;

T – термодинамикалық температура (абсолюттік температура);

t – Цельсий өлшемесі бойынша температура;

U – ішкі энергия;

u – меншікті ішкі энергия;

$\tilde{u}$ – молярлық ішкі энергия;
 V – көлем;
 $\bar{V}$ – көлемдік шығын;
 v – меншікті көлем;
 $\tilde{v}$ – молярлық көлем;
 w – жылдамдық;
 x – молярлық шоғыр (молярлық үлес), ылғал будың құрғақтық дәрежесі;
 y – ылғал будың ылғалдылық дәрежесі, жылу тұтыну негізінде өндірілген меншікті энергия.
 Z – сығылғыштық фактор;
 a – изобаралық кеңею еселеуіші, алынған бу үлесі;
 β_T – изотермиялық сығылғыштық көрсеткіші;
 γ – изохоралық қысым еселеуіш;
 η_t – айналымның термиялық пайдалы әсер көрсеткіші;
 η_i – айналымның ішкі пайдалы әсер көрсеткіші;
 η_{oi} – ішкі салыстырмалы пайдалы әсер көрсеткіші;
 η_r – өндіргіштің пайдалы әсер көрсеткіші;
 η_M – механикалық пайдалы әсер көрсеткіші;
 η_{Δ} – бушығырлы қондырғының абсолюттік пайдалы әсер көрсеткіші;
 η_{cm} – электр стансаның пайдалы әсер көрсеткіші;
 $\eta_{тэц}$ – ЖЭО дағы электр қайратын өндіру бойынша электрлік пайдалы әсер көрсеткіші;
 η_e – айналымның тиімді пайдалы әсер көрсеткіші;
 ρ – тығыздық;
 φ – көлемдік шоғырлану (көлемдік үлес);жылдамдық көрсеткіші;
 салыстырмалы ылғалдылық;
 ω – маңыздық шоғырлану (маңыздық үлес), келтірілген көлем (салыстырмалы көлем);

3. Курс бағдарламасы

3.1 Кіріспе

Термодинамика пәні мен әдістері. Негізгі түсініктер мен анықтамалар. Буқуштік айналымның технологиялық сұлбесі және техникалық термодинамика міндеттері. Бірқалыпты күйлер мен құбылыстар. Термиялық көрсеткіштер, күй теңдеулері. Термодинамикалық жүйе, қоршаған ортамен әрекеттесу тәсілдері, жылу және жұмыс.

3.2 Термодинамиканың бірінші бастамасы

Күй функциялары тәрізді ішкі энергия. Термодинамиканың бірінші бастамасының теңдеулері. Энтальпия түсінігі. Ішкі энергияның жеке туындылары.

Жылу сыйымдылық ұғымы. Жылу сыйымдылық, ішкі энергия және энтальпия, нақты және орташа жылу сыйымдылықтар арасындағы қатынас.

Ағын үшін термодинамиканың алғашқы бастамасы. Ағынның жұмыс түрлері.

3.3 Мүлтіксіз газдардың термодинамикалық құбылыстары.

Қайтымды құбылыстар, бірқалыпты түсінігі. Айналымды құбылыстар (айналымдар). Мүлтіксіз газдар: күй теңдеулері және диаграммалары, негізгі заңдар, Джоуль тәжірибесі, Майер теңдеуі. Мүлтіксіз газ қоспалары. Мүлтіксіз газдардың негізгі термодинамикалық құбылыстары, жылу және жұмыс құбылыстары, мүлтіксіз газ күйіндегі заттардың калориялық қасиеттерінің өзгеруін анықтау.

3.4 Термодинамиканың бірінші бастамасы

Қайтымды Карно айналымы, термиялық пәк-і, Карно теоремасы. Кез келген қайтымды айналым, құбылыс функциясы ретінде энтропия түсінігі, теңсіздік пен Клаузиус интегралы. Қайтымды және қайтымсыз құбылыстардағы энтропияның өзгеруі. Оқшауланған термодинамикалық жүйдегі теңдесулік шарттары.

Термодинамикалық күй ықтималдықтары. Термодинамиканың екінші бастамасының стратегиялық ұғымы.

Функция сипаттамалары. Орнықты теңдесу шарттары.

Толық газдық және термодинамикалық ыстықтық өлшемесі. Іс жүзінде термодинамикалық ыстықтық өлшемесі.

Пайдалы жұмыстың өндірулігі және қайтымдылығы. Энергия.

3.5 Заттардың термодинамикалық қасиеттері

Эндрюс тәжірибесі. Ван-Дер-Ваальс теңдеуі мен изотермасы. Тура заттардың термиялық еселеуіштері, P - T , P - V - диаграммалары, күй теңдеуі және кестелер. Заттардың калориялық қасиеттері. Фазалық теңдесулер және фазалық ауытқулар. Термодинамиканың дифференциалдық теңдеулері. Су және су буының термодинамикалық құбылыстары. h - S , T - S - диаграммалары. Ылғалды ауа, ылғалды ауаның h - d – диаграммасы, ылғалды ауадағы құбылыстар [1].

3.6 Термодинамиканың ағыны

Адиабаталық ағып шығу құбылыстары. Дыбыс жылдамдығы, дыбыс жылдамдығы арқылы ауысулар. Лаваль саптамасы. Су буының ағып шығуы. Бу және газ қоспалары, бу мен газды кедергілеу.

3.7 Газдық айналымдар

Қысымдағыштар. Піспекті қысымдағыштар жұмысының термодинамикалық айналымы және көрсеткіштік диаграммасы. Сығылу жұмысы, сатылы жағуды есептеу.

Іштен жану қозғалтқыштарының айналымдары, газшығырлы қондырғылар және реактивті қозғалтқыштар. Қозғалтқыштардың термиялық пәк-і және оны өсіру тәсілдері.

3.8 Букүштік айналымдар

Ренкин айналымы, термиялық пәк-і, оның бастапқы бу көрсеткіштеріне, аралық бу қыздырғышына және қоректік суды жаңғартулы қыздырғышқа тәуелділігі. Жылуландыру айналымы, жылуландыру еселеуші. Бинарлы айналымдар. Атомдық жылуэнергетикалық қондырғылар айналымдары. Жылу энергиясын электр энергиясына тікелей айналдырудың тәсілдері.

3.9 Тоңазытқыш қондырғылардың және жылулық сорғының айналымдары

Буіләстіргіштік, бусығымдағыштық, ауалық және бойына сіңірулік тоңазытқышты қондырғылардың айналымдары. Тоңазытқыштық еселеуші, жылу және жылулық сорғы трансформаторларының жұмыс істеу қағидалары.

3.10 Химиялық термодинамиканың негіздері және қайтымсыз құбылыстардың жылуқозғалымы

Химиялық реакциялар түрлері, реакциялардың бірқалыптылығы және қозғалғыштығы. Химиялық реакциялардың жылдамдығы, Аррениус заңы.

Қайтымсыз құбылыстардың термодинамикалық тәсілі, шашырайтын функциясы үшін жалпы өрнегі, жылуөткізгіштік теориясы [1].

1 кесте - 1-жұмысқа тапсырма нұсқалары

Тапсырма нұсқалары		Газ қоспасының құраушылары, %						Құраушылардың үлес түрі	Бастапқы күй 1 көрсеткіштері			1-2 құбылыс	Соңғы күй 3 көрсеткіштері			2-3 құбылыс
тегінің бірінші	A-Д	N ₂	O ₂	H ₂	CO	CO ₂	H ₂ O		P, бар	t, °C	ν,м ³ /кг		P, бар	t, °C	ν,м ³ /кг	
	Е-М	H ₂	CO	O ₂	CO ₂	N ₂	H ₂ O									
	Н-Ф	CO ₂	N ₂	CO	H ₂ O	O ₂	H ₂									
	Х-Я	O ₂	H ₂ O	CO ₂	N ₂	H ₂	CO									
Сынақ кітапшасының соңғы үш санының қосындысы	0	40	11	-	20	24	5	массалық	8,0	-	0,12	адиабаталық	12,0	-	0,10	изотерм.
	1	45	10	-	15	20	10	массалық	13,0	300	-	изотермиялық	5,0	17	-	адиабат.
	2	50	8	5	20	13	4	массалық	2,0	-	0,45	адиабаталық	13	300	-	изохор.
	3	55	-	10	8	27	-	көлемдік	21,0	210	-	изохоралық	35	500	-	изобар.
	4	60	2	-	-	33	5	көлемдік	2,0	0	-	политр. n=1,3	5,0	200	-	изобар.
	5	70	20	-	-	5	5	көлемдік	0,9	300	-	политр. n=1,2	4,0	200	-	изобар.
	6	40	4	10	30	16	-	молдік	25,0	-	0,13 5	политр. n=1,15	1,6	-	0,5	изобар.
	7	45	8	-	15	22	10	молдік	1,8	300	-	политр. n=1,1	3,0	-	0,1	изотерм.
	8	50	-	-	17	33	-	молдік	20,0	250	-	политр. n=1,3	3,0	-	0,3	изобар.
	9	55	12	-	15	13	5	массалық	-	200	0,12	изотермиялық	20,0	350	-	изобар.
	10	60	5	10	-	15	10	массалық	2,0	150	-	изобаралық	15,0	50	-	изотерм.
	11	65	7	5	18	-	5	массалық	4,0	100	-	адиабаталық	6,0	240	-	изотерм.
	12	70	-	18	-	10	2	массалық	3,0	27	-	изотермиялық	12,0	200	-	изохор.
	13	40	10	-	15	30	5	массалық	12,0	100	-	изотермиялық	30,0	220	-	изобар.
	14	45	5	2	30	15	3	массалық	18,0	300	-	адиабаталық	-	50	0,2	изохор.
	15	50	10	-	15	20	5	көлемдік	7,0	-	0,12	адиабаталық	20,0	200	-	изобар.
	16	55	8	-	10	17	10	көлемдік	3,0	30	-	адиабаталық	15,0	250	-	изохор.
	17	60	7	13	10	10	-	көлемдік	1,2	-	0,7	изотермиялық	6,0	150	-	изобар.
18	65	6	5	5	19	-	молдік	10,0	300	-	адиабаталық	4,0	-	0,3	изобар.	

	19	70	5	-	10	9	6	молдік	7,0	200	-	изобаралық	-	300	0,4	изотерм.
	20	40	-	20	10	30	-	молдік	10,0	250	-	изотермиялық	3,0	25	-	изобар.
	21	55	7	-	-	38	-	массалық	3,0	-	0,3	адиабаталық	10,0	200	-	изохор.
	22	45	8	10	10	27	-	массалық	10,0	250	-	изобаралық	-	180	0,2	адиабат.
	23	50	20	-	-	25	5	массалық	12,0	-	0,08	изохоралық	14,0	150	-	изобар.
	24	60	15	-	15	10	-	массалық	-	50	0,72	адиабаталық	25,0	300	-	изобар.
	25	65	7	-	6	22	-	көлемдік	12,0	30	-	политр. n=1,25	15,0	200	-	изобар.
	26	70	-	15	12	3	-	көлемдік	0,8	240	-	политр. n=1,2	5,0	220	-	изобар.
	27	45	10	-	20	15	10	көлемдік	20,0	-	0,13	политр. n=1,1	3,0	-	0,1	изотерм.

Әдістемелік нұсқау жылуэнергетикалық мамандығының студенттеріне су буының және мүлтіксіз газдардың термодинамикалық құбылыстары тақырыбынан өзіндік жұмыс жасауға практикалық қосымша ретінде арналған. Әдістемелік нұсқауда Техникалық термодинамика курсының бірінші бөлімінің негізінде жасалған үш тапсырма берілген. Тапсырмалар келесі тақырыптарға құралған: газды қоспалар және жылу сыйымдылық; мүлтіксіз газдардың термодинамикалық теңесу құбылыстарын есептеу; су буы күйінің өзгеру құбылысын есептеу.

Техникалық термодинамика курсы бойынша есептің мақсаты, белгіленуі және ерекшеліктері [1].

Термодинамиканы оқу кезінде студенттердің теориялық білімін практикалық есептерге және термодинамикалық талдауларға қолданылуына үлкен мән беру қажет. Өз кезегінде есептердің шешуі теориялық материалдарды терең түсінудің негізгі тәсілі болып табылады. Студенттер өзіндік жұмыстарға көп көңіл аударуы қажет.

Есепті дұрыс түсініп шығару үшін:

- Есепте берілген құбылыстардың физикалық жағдайын және қозғалымын ұғып, осы құбылыс іске асатын қондырғыны ойша елестету.

- Оған кіретін есеп қатынастарының, кейіптемелерінің және өлшемдерінің физикалық мазмұнын ұғыну.

- Есеп шартына және кейіптемеге кіретін барлық өлшемдердің бірліктерін білу және оларды қояр алдында бірліктер жүйесіне (СИ) келтіру қажет.

- Есепті шығару жолын және есеп нәтижелерінде алып, оларды ойша талдау.

Студент есеп шығару кезінде дұрыс әдісті қолдануы керек, ал негізгісі

- Есептің шартын толық көшіру.

- Есеп шартына кіргізілген және есептеу кезіндегі кездескен өлшемдердің бірліктерін қою.

- Пайдаланған.

- Есепті алдымен жалпы түрде орындау, яғни кейіптемелерді алу, сосын осы кейіптемелерге кіргізілген өлшемдерді қою.

- Зерттелген аймақтағы практикалық мәнінің және теорияға сәйкес мәнін, өлшемдерін қарастыру, талдау жүргізу.

Құбылысты термодинамикалық саралау термодинамика заңының бірінші және екінші жағдайына негізгі қарастырылған құбылыс заңдылыққа сәйкес математикалық жолмен шығарылады.

Көбінесе, денелердің бір бөлігі теңдеулі күйінде қасиеттерін және құбылыстарда энергияның ауысу ерекшеліктерін анықтау керек. Анықталған өлшемдерге көбінесе дененің бастапқы және соңғы жағдайындағы істелінген жұмыс, берілген немесе алынған жылу көрсеткіштері жатады.

Жылу техникалық қондырғылардың жұмысын анықтауға және термодинамикалық құбылыстар: изохора - көлем тұрақты болғанда, изобара -

қысым тұрақты, изотермия - температура тұрақты, изоэнтропты - энтропия (адиабаталық құбылыс) маңызды мағына береді [1].

4. №1 есептік-сызба жұмыс. Идеал газдың және газ қоспаларының құбылыстары

Құраушылар үлесіне сәйкес идеал газ қоспалары берілген.

Термодинамикалық жүйесінде қайтымды 1-2-3 құбылыстары іске асырылады. 1 – 3 және 1-2 и 2-3 құбылыстарының термиялық күй көрсеткіштері берілген.

Жұмыстың мақсаты: 1-3 құбылысындағы меншікті энтальпияның, энтропияның, ішкі энергияның өзгеруін және 1-2,2-3 құбылыстарындағы p, v, T барлық жағдайдағы орташа жылусыйымдылықтарды, жұмысты, жылуды және термиялық көрсеткіштерді нақтылау. p, v ; p, T ; v, T ; Ts - диаграммаларында мүлтіксіз газ күйінің құбылыстарын сипаттау.

4.1 Жұмысқа әдістемелік көрсеткіштер

4.1.1 Негізгі формулалар

Мүлтіксіз газ күйінің теңдеуі

$$1 \text{ кг үшін} \quad pv = RT, \quad (4.1)$$

$$m \text{ кг үшін} \quad pV = mRT, \quad (4.2)$$

$$1 \text{ киломол үшін} \quad p\bar{v} = \tilde{R}T. \quad (4.3)$$

Газ қоспасының құрамындағы құраушылар үлестері келесідей анықталады

$$\text{массалық үлес} \quad w_i = m_i / m_{\text{кп}}, \quad m_{\text{кп}} = \sum m_i, \quad (4.4)$$

$$\text{молярлық үлес} \quad x_i = n_i / n_{\text{кп}}, \quad n_{\text{кп}} = \sum n_i, \quad (4.5)$$

$$\text{көлемдік үлес} \quad \varphi_i = V_i / V_{\text{кп}}, \quad V_{\text{кп}} = \sum V_i, \quad (4.6)$$

мұндағы V_i - газдың i -ші құраушысының келтірілген (парциалдық). Мүлтіксіз газдар үшін $x = \varphi$.

Газ құраушыларының үлестері өзара келесідей байланыста

$$w_i = \frac{x_i M_i}{\sum x_i M_i}, \quad x_i = \frac{w_i / M_i}{\sum w_i / M_i}, \quad (4.7)$$

мұндағы M_i - газдың i -ші құраушысының молярлық массалары.

Газ қоспасының тұрақтысы $R_{\text{кп}}$ және $\mu_{\text{кп}}$ молекулалық массасы келесі қатынастармен анықталады

$$R_{\text{кп}} = \sum w_i R_i, \quad (4.8)$$

$$M_{\Sigma} = \sum x_i M_i. \quad (4.9)$$

Мүлтіксіз газ қоспалары үшін Дальтон және Амага (зандары) теңдеулері.

$$p_{\Sigma} = \sum p_i, \quad p_i = x_i p_{\Sigma}, \quad (4.10)$$

$$V_{\Sigma} = \sum V_i, \quad V_i = x_i V_{\Sigma}. \quad (4.11)$$

Тығыздық шамасы $\rho_{\Sigma} = 1/v$. Газ қоспалары үшін

$$\rho_{\Sigma} = \sum \rho_i R_i / R_{\Sigma} \quad (4.12)$$

T_1 және T_2 температуралар аралығындағы нақты және орташа жылуsыйымдылықтары келесі қатынаспен байланысқан

$$C_x \Big|_{T_1}^{T_2} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} C_x dT}{T_2 - T_1}. \quad (4.13)$$

Газ қоспаларының жылуsыйымдылықтары, мысалы, меншікті изобаралық жылуsыйымдылығы келесі формула бойынша анықталады

$$c_{p_{\Sigma}} = \sum w_i c_{p_i}. \quad (4.14)$$

Политроптық құбылысының жылуsыйымдылығы

$$c_n = c_v \frac{n-k}{n-1}. \quad (4.15)$$

Мүлтіксіз газдар үшін Майер теңдеуі

$$\tilde{n}_p - \tilde{n}_v = R; \quad \tilde{n}_p - \tilde{n}_v = \tilde{R}. \quad (4.16)$$

Термодинамиканың бірінші заңы

1кг қоспа үшін

$$dq = du + d\ell,$$

$$dq = du + pdv; q_{1-2} = u_2 - u_1 + \int_{v_1}^{v_2} pdv. \quad (4.17)$$

Біртекті қалыптасқан ағын үшін термодинамиканың бірінші заңы

$$dq = dh + wdw + gdz + d\ell_{\text{техн}},$$

$$q_{1-2} = h_2 - h_1 + \frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \ell_{\text{техн}}. \quad (4.18)$$

Термодинамиканың екінші заңы

$$\oint \frac{dq}{T} \leq 0; \quad dS \geq \frac{dq}{T}. \quad (4.19)$$

Термодинамикалық тепе – теңдік теңдеуі

$$Tds = du + pdv, \\ Tds = dh - vdp. \quad (4.20)$$

Мүлтіксіз газдармен құбылыстар:

1) изохоралық құбылыс ($v = \text{const}, n = \pm \infty, c = c_v$)

$$\begin{aligned}\frac{p_2}{p_1} &= \frac{T_2}{T_1}, \\ d\ell &= 0, \\ dq &= du; \quad q_{1-2} = u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT;\end{aligned}\tag{4.21}$$

2) изобаралық құбылыс ($p = \text{const}, n = 0, c = c_p$)

$$\begin{aligned}\frac{v_2}{v_1} &= \frac{T_2}{T_1}, \\ d\ell &= p dv, \quad \ell_{1-2} = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1), \\ q_{1-2} &= h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT;\end{aligned}\tag{4.22}$$

3) изотермиялық құбылыс ($T = \text{const}, n = 1, c = \pm \infty$)

$$\begin{aligned}p_2 v_2 &= p_1 v_1, \\ du &= 0, \\ dq &= d\ell; \quad q_{1-2} = \ell_{1-2} = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2};\end{aligned}\tag{4.23}$$

4) адиабаталық құбылыс ($dq = 0, q = 0, n = k, c = 0$)

$$\begin{aligned}\frac{T_2}{T_1} &= \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad \frac{\dot{O}_2}{\dot{O}_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}; \quad p_2 v_2^k = p_1 v_1^k, \\ d\ell &= -du; \quad \ell_{1-2} = u_1 - u_2, \\ R &= \frac{c_p}{c_v} = \frac{h_2 - h_1}{u_2 - u_1}; \quad \ell_{1-2} = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right];\end{aligned}\tag{4.24}$$

5) политроптық құбылыс ($n = \text{const}, c_n = c_v \frac{n-k}{n-1}$)

$$\begin{aligned}p_2 v_2^n &= p_1 v_1^n, \\ dq &= c_n dT; \quad q_{1-2} = c_n (T_2 - T_1), \\ \ell_{1-2} &= \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \right].\end{aligned}\tag{4.25}$$

4.2.2 Мысал: 0 нұсқа тапсырмасының шешуі

Тапсырма шарты: құраушылары массалық үлестірілген мүлтіксіз газ қоспасы берілген: N_2 – 40%; O_2 – 11%; CO – 20%; CO_2 – 24%; H_2O – 5%. Алғашқы термодинамикалық жүйе (АТЖ) 1 күйде $p_1 = 8,0$ бар, $v_1 = 0,12$ м³/кг көрсеткіштерімен болады. Жүйе қайтымды 1-2 адиабаталық құбылысынан, содан кейін 2-3 изотермиялық құбылысынан өтеді және $p_3 = 12,0$ бар, $v_3 = 0,10$ м³/кг көрсеткіштерімен 3 күйге келеді [1].

Анықтау: 1,2,3 күйіндегі p , v , T термиялық көрсеткіштерін, ішкі энергия өзгерісін, энтальпиясын, энтропиясын: 1-2, 2-3 үдерістердегі жұмысы пен жылуын.

Шешуі: қоспа құраушыларының молярлық массасы: $M_{N_2}=28$, $M_{O_2}=32$, $M_{CO}=28$, $M_{CO_2}=44$, $M_{H_2O}=18$. Газ құраушыларының газ тұрақтылары, Дж/кг·К, $R_{N_2} = 296,93$; $R_{O_2} = 259,81$; $R_{CO} = 296,93$; $R_{CO_2} = 188,95$; $R_{H_2O} = 461,89$.

(3.8) бойынша газ қоспасының тұрақтысы

$$R_{\text{кп}} = \sum w_i R_i = 0,4 \cdot 296,93 + 0,11 \cdot 259,81 + 0,20 \cdot 296,93 + 0,24 \cdot 188,95 + 0,05 \cdot 461,89 = 275,17 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}.$$

Газ қоспасының молекулярлық массасы 2 әдіспен анықталады:

$$\text{а) } M_{\text{кп}} = \frac{8314}{R_{\text{см}}} = 30,21 \text{ кг/кмоль};$$

б) (4.7) бойынша x_i анықтаймыз, содан кейін (4.9) бойынша $M_{\text{кп}}$ анықтаймыз. Газ құраушыларының молярлық үлесі (4.7) бойынша

$$x_{N_2} = 0,43; \quad x_{O_2} = 0,106; \quad x_{CO} = 0,219;$$

$$x_{CO_2} = 0,139; \quad x_{H_2O} = 0,086.$$

$$M_{\text{кп}} = \sum x_i M_i = 0,427 \cdot 28 + 0,105 \cdot 32 + 0,218 \cdot 28 + 0,166 \cdot 44 + 0,085 \cdot 18 = 30,25 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}.$$

Есептеу нәтижесінің қателігі алдын ала келтірілген қателікке сәйкес келеді. $M_{\text{кп}} = 30,21 \text{ кг/кмоль}$ қабылдаймыз.

1 кг газ қоспасы үшін күй теңдеуі келесідей болады

$$pv = \frac{8314}{30,21} T = 275,17 T$$

T_1 , T_3 анықтаймыз

$$T_1 = \frac{8 \cdot 10^5 \cdot 0,12}{275,17} = 348,87 \text{ К} (75,72^\circ \text{C}),$$

$$T_3 = \frac{12 \cdot 10^5 \cdot 0,10}{275,17} = 436,09 \text{ К} (162,94^\circ \text{C})$$

2 күйінің термиялық көрсеткіштерін анықтаймыз.

Алынған температуралар аралығы үшін [2] нақты жылуsыйымдылық мәндері бойынша адиабаталық көрсеткішін $\bar{k} = \bar{c}_p / \bar{c}_v$ (4.24) бойынша анықтаймыз. Сызықты функцияның температураларына жылуsыйымдылықтың тәуелділігін аламыз. Сонда, (4.13) бойынша $t_1 \div t_2$ температуралар аралығындағы орташа жылуsыйымдылық $(t_1 + t_2)/2$ кезіндегі орташа температурадағы нақты жылуsыйымдылық болып табылады. Біздің тапсырмада $t_{op} = 119,33^\circ\text{C}$. Деректер бойынша $(75 \div 175)^\circ\text{C}$ температуралар аралығындағы орташа жылуsыйымдылық мәндерін интерполяциялау әдісімен анықтаймыз [4]:

Қоспа құраушылары	$\bar{c}_p$	$\bar{c}_v$	$\bar{k}$
N ₂	1,0442	0,7474	1,397
O ₂	0,9393	0,6795	1,382
CO	1,0476	0,7508	1,395
CO ₂	0,9075	0,7408	1,225
H ₂ O	1,9005	1,4390	1,321

Газ қоспаларының $\bar{c}_{p_{\bar{t}}}$, $\bar{c}_{v_{\bar{t}}}$, $\bar{k}_{\bar{t}}$ орташа жылуsыйымдылықтары тең

$$\bar{c}_{p_{\bar{t}}} = \sum w_i \tilde{n}_{\delta i} = 0,4 \cdot 1,0442 + 0,11 \cdot 0,9393 + 0,2 \cdot 1,0476 + 0,24 \cdot 0,9075 + + 0,05 \cdot 1,9005 = 1,0433,$$

$$\bar{c}_{v_{\bar{t}}} = \sum w_i \tilde{n}_{vi} = 0,4 \cdot 0,7474 + 0,11 \cdot 0,6795 + 0,2 \cdot 0,7508 + + 0,24 \cdot 0,7408 + + 0,05 \cdot 1,4390 = 0,7735.$$

$$\bar{k}_{\bar{t}} = \frac{\bar{c}_{p_{\bar{t}}}}{\bar{c}_{v_{\bar{t}}}} = 1,348, \quad \bar{k}_{\bar{t}} = 1,35 \text{ мәнін қабылдаймыз.}$$

1-2 адиабаталық және 2-3 изотермалық теңдеулерінің шешімінен

$$p_1 v_1^{\bar{k}} = p_2 v_2^{\bar{k}}; p_2 v_2 = p_3 v_3 \text{ келесіні аламыз}$$

$$v_2 = \left(\frac{p_1 v_1^{\bar{k}}}{p_3 v_3} \right)^{\frac{1}{\bar{k}-1}} = 0,063 \text{ м}^3 / \text{кг},$$

$$p_2 = \frac{p_3 v_3}{v_2} = 19,05, \text{ бар.}$$

Күйдің термиялық көрсеткіштерін анықтаймыз:

$$1) p_1 = 8 \text{ бар}, v_1 = 0,12 \text{ м}^3 / \text{кг}, t_1 = 75,72^\circ\text{C};$$

$$2) p_2 = 19,05 \text{ бар}, v_2 = 0,063 \text{ м}^3 / \text{кг}, t_2 = 162,94^\circ\text{C};$$

$$3) p_3 = 12,0 \text{ бар}, v_3 = 0,10 \text{ м}^3 / \text{кг}, t_3 = 162,94^\circ\text{C}.$$

Берілген құбылыстарда газ қоспасының калориялық қасиеттерінің өзгерісін анықтаймыз:

1-2 адиабаталық құбылыс

$$(dq=0, q_{1-2}=0;),$$

$$s=const \quad s_2 - s_1 = 0,$$

$$\ell_{1-2} = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right] = \frac{8,0 \cdot 10^5 \cdot 0,12}{1,35-1} \left[1 - \left(\frac{0,12}{0,063} \right)^{1,35-1} \right] = -136,6 \text{ кДж/кг},$$

$$u_2 - u_1 = 136,6 \text{ кДж/кг},$$

$$h_2 - h_1 = (u_2 - u_1) \cdot \frac{c_p}{c_v} = 136,6 \cdot \frac{1,0433}{0,7735} = 184,41 \text{ кДж/кг}.$$

2-3

изотермиялық

құбылыс

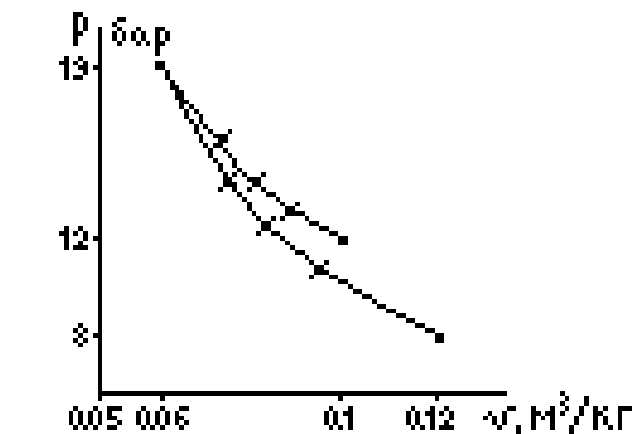
$$du=0; \quad u_2 = u_1,$$

$$q_{2-3} = \ell_{2-3} = RT \ln \frac{p_2}{p_3} = 275,17 \cdot 436,09 \cdot \ln \frac{19,05}{12,0} = 55,459 \text{ кДж/кг},$$

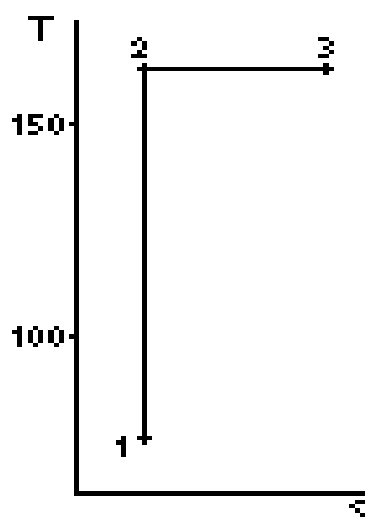
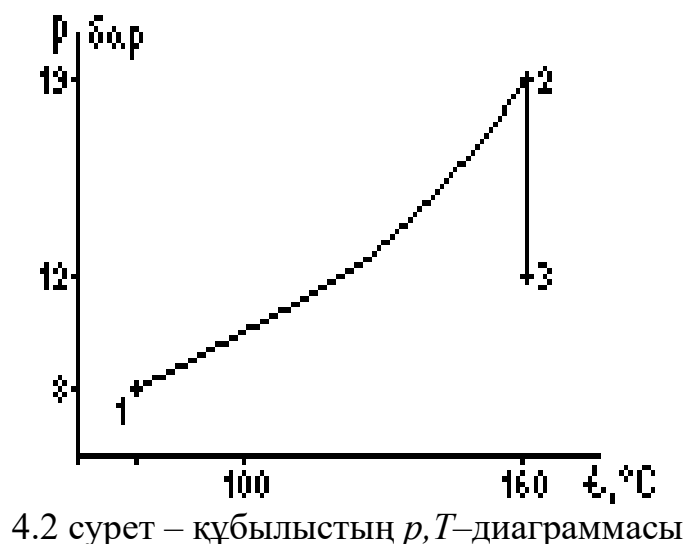
$$s_3 - s_2 = \frac{q_{2-3}}{T} = \frac{55,459}{436,09} = 0,127 \text{ кДж/кг},$$

$$h_3 - h_2 = 0.$$

Термодинамикалық құбылыстарды p, v ; p, T ; Ts - диаграммаларында тұрғызу кезінде 1 күйдің энтропиясын 13-19 [3] кестеден алынған s_o құраушылары бойынша газ қоспалары үшін есептелген $s_{осм}$ тең деп қабылдау керек [1].



4.1 сурет – құбылыстың p, v -диаграммасы



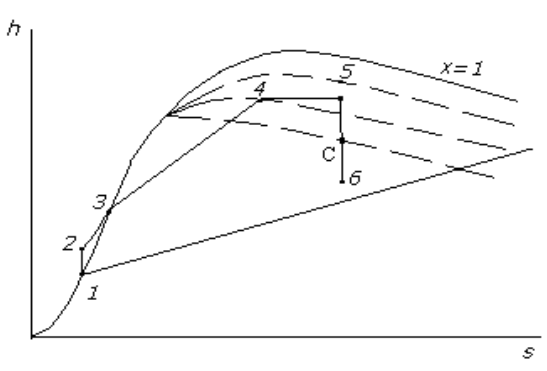
Күй диаграммасын тұрғызу үшін тапсырмадағы құбылыстардың сызығында жұлдызшалап көрсетілген аралық құбылыстар нүктелері үшін (4.21-4.25) теңдеулерді пайдалана отырып, термиялық және калориялық көрсеткіштерін анықтау қажет.

Бұл үшін компьютерде өз нұсқаңыздың тапсырмасын шешудің алгоритмін құрастырып, одан кейін блок-схемасының бағдарламасын жасау қажет. Жұмысты компьютерде немесе қолмен есептеу нәтижесінде орындауға болады [1].

5. №2 есептік-сызба жұмыс. Су және су буындағы жылуқозғалымдық құбылыстар

Судың жағдайы қанығу қысымы p_1 , бар кезінде болды. Судың қысымы p_2 , бар кезінде сорғы көмегімен құрғақтық дәрежесін x_4 дейін изобаралық қыздырылатын бу генераторына жіберіледі, содан кейін x_5 құрғақтық дәрежеге дейін кедергіге ұшырайды (дросселируется). Бу ары қарай тарылғыш саптамаларға (суживающее сопло) барады. Саптамадан кейінгі бу күйі p_6 , бар

қысымымен сипатталады (5.1 суретті қара). Барлық құбылыстарды қайтымды деп қабылдау керек.



5.1 сурет – Құбылыстың h, s -диаграммасы

5.1 Жұмыстың тапсырмасы

Әрі қарай «Су және су буының термодинамикалық қасиеттерінің кестесін» пайдалана отырып, 1,2,3,4,5,6 күйлерінің калориялық және термиялық көрсеткіштерін табу, 4-5 құбылысындағы интегралды дроссель-эффектісін анықтау, саптама қимасындағы бу көрсеткіштерін, келтірілген су және бу жылуын, саптамадан шығар бу жылдамдығын анықтау керек.

5.2 Жұмысқа әдістемелік көрсеткіштер

5.2.1 Негізгі есептік қатынастар.

Кестенің мәндері су және су буының калориялық қасиеттерінің p, v, T тәжірибелік – зерттеу барысында алынған көрсеткіштік мәндері болып табылады. Кестеде аргумент ретінде температура және қысымның жуықтаған мәндері қолданылады. Бұл мәндердің аралығындағы мәндерді табу үшін сызықты интерполяция әдісін пайдаланған дұрыс [1].

2 кесте – 2 жұмысқа тапсырма нұсқалары

Тапсырма нұсқалары					p_1 , бар	x_4	x_5	p_6 , бар
Сынақ кітапшасы- ның соңғы үш санының қосындысы	Фамилияның бастапқы әріпі							
	А-Д	Е-М	Н-Ф	Х-Я				
	p_2 , бар	p_2 , бар	p_2 , бар	p_2 , бар				
0	50	51	64	72	0,015	0,90	0,93	0,90
1	47	53	66	74	0,017	0,91	0,94	1,00
2	44	55	68	76	0,019	0,92	0,95	0,80
3	41	57	70	80	0,021	0,93	0,96	0,70
4	38	60	72	50	0,023	0,90	0,93	0,60
5	36	62	74	47	0,025	0,91	0,94	0,50

6	34	64	76	44	0,027	0,92	0,95	0,40
7	32	66	80	41	0,030	0,93	0,96	0,30
8	33	68	50	38	0,032	0,90	0,93	0,40
9	37	70	47	36	0,035	0,91	0,94	0,50
10	40	72	44	34	0,037	0,92	0,95	0,60
11	43	74	41	32	0,039	0,93	0,96	0,70
12	46	76	38	33	0,042	0,90	0,93	0,80
13	48	80	36	37	0,045	0,91	0,94	0,90
14	51	50	34	40	0,050	0,92	0,95	1,00
15	53	47	32	43	0,052	0,93	0,96	0,30
16	55	44	33	46	0,054	0,90	0,93	0,35
17	57	41	37	48	0,057	0,91	0,94	0,40
18	60	38	40	51	0,060	0,92	0,95	0,45
19	62	36	43	53	0,050	0,93	0,96	0,50
20	64	34	46	55	0,040	0,90	0,93	0,55
21	66	32	48	57	0,035	0,91	0,94	0,60
22	68	33	51	60	0,030	0,92	0,95	0,65
23	70	37	53	62	0,025	0,93	0,96	0,70
24	72	40	55	64	0,020	0,90	0,93	0,75
25	74	43	57	66	0,015	0,91	0,94	0,80
26	76	46	60	68	0,018	0,92	0,95	0,85
27	80	48	62	70	0,022	0,93	0,96	0,90

Судың негізгі үштік нүктедегі көрсеткіштері: $p_{тр} = 610,8$ Па, $T_{тр} = 273,16$ К, $v_{тр} = 1,0002$ см³/г, критикалық көрсеткіштері: $p_{кр} = 22,115$ МПа, $t_{кр} = 374,12$ °С, $v_{кр} = 0,003147$ м³/кг.

Үштік нүктедегі меншікті ішкі энергия және энтропия мәндері нөлге тең деп алынады. Үштік нүктедегі қажыры $h_{тр} = 0,611$ Дж/кг, критикалық нүктеде $h_{кр} = 2095,2$ кДж/кг, $s_{кр} = 4,4237$ кДж/кг·К

Ылғалды бу аумағындағы көрсеткіштер құрғақтық дәрежесі x бойынша анықталады.

$$\begin{aligned}
 v_x &= v'(1-x) + v''x, \\
 h_x &= h'(1-x) + h''x, \\
 u_x &= u'(1-x) + u''x, \\
 s_x &= s'(1-x) + s''x.
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Адиабаттық дросселдеу кезінде $h = \text{const}$. Интегралды тиімді-дроссельдеу төменгі формуламен анықталады

$$T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h dp . \tag{5.2}$$

Будағы дыбыс жылдамдығы Лаплас теңдеуі арқылы анықталады

$$a = \sqrt{(\partial p / \partial s)_s} = \sqrt{-v^2 (\partial p / \partial v)_s}. \quad (5.3)$$

Саптамадан шығардағы бу ағысы кезінде үйкеліссіз жылдамдығы төменгі қатынаспен анықталады

$$w_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2) + w_1^2}. \quad (5.4)$$

Кептіргіш саптамадан шығар будың максимал жылдамдығы

$$w_2^{\max} \leq a. \quad (5.5)$$

Сондықтан саптамадағы пайдаланылған жылуқұламасы құрайды:

$$\Delta h = \frac{a^2 - w_1^2}{2}, \quad (5.6)$$

мұндағы a - дыбыстың жергілікті жылдамдығы.

5.2.2 Мысал: 0 нұсқасының шешуі.

Тапсырма шарты: Берілген су және бу көрсеткіштері $p_1 = 0,015$ бар, $p_2 = 50$ бар, $x_4 = 0,90$, $x_5 = 0,93$, $p_6 = 0,90$ бар.

Анықталуы: кесте көмегімен 1,2,3,4,5,6 (5.1 суретті) қара нүктелеріндегі көрсеткіштерді анықтау, $T_5 - T_4$, q_{1-4} , w_2 , көрсеткіштері саптама қимасындағы бу көрсеткіштері [1].

Шешуі: 2 кесте бойынша $p_1 = 0,015$ бар = $1,5 \cdot 10^3$ Па кезіндегі $t_1 = 13,034$ °C, $v_1 = 0,0010006$ м³/кг, $h_1 = 54,71$ кДж/кг, $s_1 = 0,1956$ кДж/кг·K, $u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 54,71 - 1,5 \cdot 10^3 \cdot 0,0010006 = 54,708 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

2 нүкте (күй) көрсеткіштерін анықтау керек. $p_2 = 50$ бар = $5 \cdot 10^6$ Па. Бұл су аймағы болып табылады. III кестені пайдаланамыз. $v_2 = v_1 = 0,0010006$ м³/кг., интерполяция көмегімен h_2 анықталуы керек

$$h_2 = 88,6 + \frac{130,2 - 88,6}{0,0010021 - 0,0009995} \cdot (0,0010006 - 0,0009995) =$$

$$= 88,6 + \frac{41,6}{0,0000026} \cdot 0,0000011 = 88,6 + 17,6 = 106,2 \text{ кДж/кг},$$

$$t_2 = 20 + (30 - 20) \cdot \frac{17,6}{41,6} = 20 + (30 - 20) \cdot 0,423 = 24,23^\circ\text{C}$$

$$s_2 = 0,2952 + (0,4350 - 0,2952) \cdot 0,423 =$$

$$= 0,3543 \text{ кДж/кг} \cdot \text{K}.$$

3 нүкте (күй) жағдайын p_2 изобара бойынша сол жақ шекаралық қисық сызықта анықтау керек. $p_3 = p_2 = 5,0$ МПа. II кестені пайдаланады:

$$t_3 = 263,92^\circ\text{C},$$

$$v_3 = 0,0012858 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$h_3 = 1154,6 \text{ кДж/кг},$$

$$s_3 = 2,9209 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}.$$

5,0 МПа изобара бойынша оң жақ шекаралық қисықтағы бу көрсеткіштері:

$$\begin{aligned} v'' &= 0,03941 \text{ м}^3/\text{кг}, \\ h'' &= 2792,8 \text{ кДж/кг}, \\ s'' &= 5,9712 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}. \end{aligned}$$

4 нүктеде $x_4 = 0,90$. Осы жерден (5.1) бойынша

$$\begin{aligned} t_4 &= 263,92^\circ\text{C}, \\ v_4 &= 0,0012858 \cdot 0,10 + 0,90 \cdot 0,03941 = 0,03082 \text{ м}^3/\text{кг}, \\ h_4 &= 1154,6 \cdot 0,1 + 0,9 \cdot 2792,8 = 2628,98 \text{ кДж/кг}, \\ s_4 &= 2,9209 \cdot 0,1 + 0,9 \cdot 5,9712 = 5,6662 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}. \end{aligned}$$

Адиабаттық дросселдеу кезінде $h = \text{const}$, $h_4 = h_5 = 2628,98 \text{ кДж/кг}$,

$x_5 = 0,93$. h , s – диаграммасында бойынша су және су буының $h = \text{const}$ сызығын жүргізу арқылы, қалған көрсеткіштерді анықтаймыз, қиылысқан сызық нүктесі $x = 0,93$ құрғақтық дәрежелі 5 нүктесі болып табылады. Диаграмма және кесте бойынша күй көрсеткіштері анықталады.

$$\begin{aligned} p_5 &= 9 \text{ бар}, \\ v_5 &= 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}, \\ t_5 &= 175,36^\circ\text{C}, \quad h' = 742,6 \text{ кДж/кг}, \quad h'' = 2773,0 \text{ кДж/кг}, \\ s_5 &= 0,07 \cdot 2,0941 + 0,93 \cdot 6,6212 = 6,3043 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}, \\ s' &= 2,0941 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}, \\ s'' &= 6,6212 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}. \end{aligned}$$

(5.1) бойынша есептегенде

$$h_5^{\text{есеп}} = 2630,87 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$$

Техникалық есептеу қатесі h_4 мәнімен жақсы сәйкес келеді.

Интегралды дроссель-эффектісі

$$t_5 - t_4 = 175,36 - 263,92 = -88,56^\circ\text{C}.$$

Бу генераторына жылу 2-3-4 изобара бойынша жылу әкелінеді

$$q_{2-4} = h_4 - h_2 = 2628,98 - 106,2 = 2522,78 \text{ кДж/кг},$$

сорғы жұмысы

$$\ell_c = h_2 - h_1 = 106,2 - 54,71 = 51,49 \text{ кДж/кг}.$$

Ылғалды бу 6 жағдайы h , s – диаграммасында изобара $p = 0,9$ бар және изоэнтропия $s = 6,3043 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$ қиылысында анықталады. 6 күй жағдайының көрсеткіштері кесте бойынша анықталуы керек. $p = 0,9$ бар кезінде, $s' = 1,2696$, $s'' = 7,3963$ және

$$x = \frac{s_s - s'}{s'' - s'} = \frac{6,3043 - 1,2696}{7,3963 - 1,2696} = 0,82.$$

(5.1) қатынасы бойынша келесі мәндер анықталады

$$\begin{aligned} t_6 &= 96,71^\circ\text{C}, \\ h_6 &= 405,24 \cdot 0,18 + 2671,1 \cdot 0,82 = 2263,24 \text{ кДж/кг}, \end{aligned}$$

$$\nu_6 = 1,5337 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

5-6 изоэнтропа құбылысына екі жағдайды қарастырамыз:

$$\nu_1 = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг}, p_1 = 2,5 \text{ бар};$$

$$\nu_2 = 0,9 \text{ м}^3/\text{кг}, p_2 = 1,6 \text{ бар}.$$

Осы көрсеткіштер бойынша (5.3) дыбыс жылдамдығы анықталады

$$a = \sqrt{-(0,7)^2 \frac{(1,6 - 2,5) \cdot 10^5}{0,9 - 0,6}} = 383,4 \text{ м/с}.$$

(5.4) бойынша қолданылған жылуқұламасы мынаған тең

$$\Delta h = \frac{a^2}{2} = 73,5 \text{ кДж / кг}.$$

Саптама қимасындағы бу күйі s және h мәндері бойынша анықталады

$$h_c = h_5 - \Delta h = 2628,98 - 73,5 = 2555,48 \text{ кДж/кг},$$

$$\nu_c = 0,32 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$p_c = 5,6 \text{ бар},$$

$$t_c = 156,16^\circ\text{C}.$$

Барлық күйлерді h , s – диаграммасына енгізіп, 1-6 құбылысын тұрғызу керек. 5-6 изоэнтропия құбылысында s – нүктесі, яғни саптама қимасындағы бу күйі көрсетілуі керек.

Нәтижесінде тапсырма шешімінің алгоритмдік блок-схемасын құрастыру керек [1].

6. №3 есептік-сызба жұмыс. Су буы күйінің өзгеру құбылысының есебі

6.1 Су және су буының кейбір термодинамикалық қасиеттері

Су және су буын жылуалмасу қондырғыларында жылутасығыш ретінде және көп өндірістерді технологиялық қондырғыларында, жылуқайраттық қондырғыларда жұмысшы дене ретінде көп қолданылады.

Көп жағдайларда су буын сұйыққа жақын күйінде қолданады. Сол үшін алу құбылыстарында және қолдану кезінде ол екі фазалық күйде (ол дымқыл қаныққан бу) немесе сұйық күйінде (су) болуы мүмкін. Осының барысында, су буы жүргізілген күй өзгеру құбылысы оның агрегаттық күйінің өзгеруімен жүргізіледі.

Егер мүлтіксіз газдарда әрекеттесу күші болмаса, онда су буының қасиетіне маңызды, кейде анықтайтын әсерін тигізеді.

Әрекеттесу күші молекулалар арасында фазалық ауысуларын, яғни заттардың агрегаттық күйінің өзгеруі, жылусыйымдылығының тәуелділігі, су буының мүлтіксіз газдардағыдай ішкі қайратын және қажырын қысым арқылы жасайды. Су буының молекулалары арасында әрекеттесу күшінің дәлдігі сұйығыштық көрсеткішінің қысымға және температураға тәуелділігімен көрсетіледі. Сол үшін су буының термодинамикалық құбылыстары мүлтіксіз газдардың күй талдауына қарағанда жоғары көрсетілген аймақтарда жылу

сыйымдылығын қолданбайды. Бұл жағдайда громоздқостқа және күй аймақтарының анықталу шегіне қарай су буының термодинамикалық теңдеуі қолданылмайды. (бұл жерде $pv=RT$ мүлтіксіз газдардың термодинамикалық күй теңдеуі қолданылмайды). Мүлтіксіз газдарға тән күй өзгеру құбылысының монотонды заңы су буында әртекті күй аймағы біртекті күй аймағына өткенде секірмелі түрде ауысады (керісінше) және күйдің екінші көрсеткішінің арасындағы функциялық тәуелділігі түрінде жазылмайды.

Су және су буының күй өзгеру құбылысында және күй талдау кезінде су буының күй теңдеуін қолданып жүргізілген тәжірибелік зерттеулер негізінде жасалған су және су буының термодинамикалық қасиетінің кестесі қолданылады. Мұндай кестелер су және су буының фазалық өту шекарасының көрсеткіштерінен бөлек және арнайы суға, яғни қайнағанға дейінгі ысымаған және аса қыздырылған буға арналған.

Берілген термодинамикалық кестелер фазалық шекарасындағы көрсеткіштерді, яғни қайнаған су көрсеткіштерін және құрғақ қаныққан бу көрсеткіштерін анықтауға мүмкіндік береді. Бұл кестені және құрғақтық дәрежесі x -ті пайдаланып, дымқыл қаныққан бу көрсеткішін, оның фазалық өту шекарасындағы және құрғақтық дәрежесіндегі мағынасын және оның белгілі көрсеткіштерінің тәуелділігін анықтауға болады. Сонымен бірге судың әр күйіндегі, қайнауға дейін ысымаған және аса қыздырылған будың белгілі көрсеткіштерін, мысалы: температура және қысым арқылы көрсеткіштерін анықтауға болады [1].

Кестеде ішкі қайраттың мағынасы келтірілмейді, себебі судың және будың әртүрлі күйінің ұзындығы $u = h - pv$ тәуелділігімен есептеледі.

Су буы күйінің өзгеру құбылысы және күй талдаудың сызбасы pv -, Ts -, және hs -диаграммасында берілген термодинамикалық кесте бойынша жасалған.

Сызбаны талдау әдісі дәлдігі жағынан көрсетілген кесте бойынша жүргізілген талдаудан кейін тұрады, бірақ ол іс жүзіндегі және әдістегі сипаттаманың артықшылығын иеленеді. Ол тек есепті тездетіп қана қоймай, сонымен бірге оны түсінуге бірталай қолайлы етеді.

Су буының күй өзгеру құбылысының және күй талдау ерекшелігі көрсетілген кестенің көмегімен талдау толық көрсетіледі, бірақ студент фазалық өту шекараларын, су және су буының термодинамикалық диагностикадағы әр түрлі агрегаттық күйдегі аймақтарын басынан бастап білуі қажет. Бұл аймақтар әдісі pv -, Ts -, және hs -диаграммасында 1-суретте көрсетілген:

1-қайнағанға дейін қыздырылмаған су аймағы;

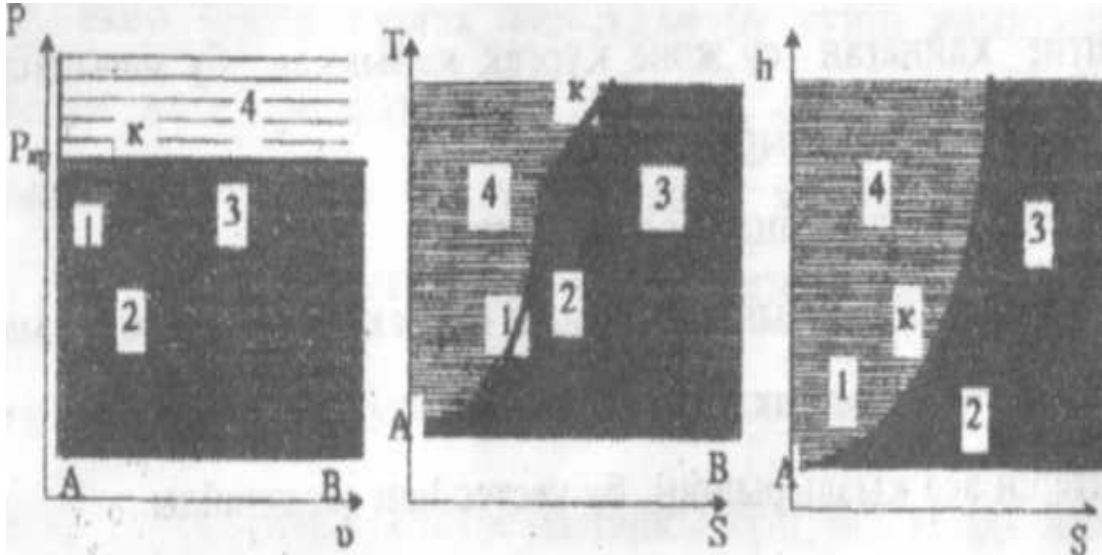
2-дымқыл қаныққан бу аймағы;

ЖШ қисығы (жоғарғы қисықтық шекарасы) – құрғақ қаныққан бу аймағы;

III (шекті нүкте)-су күйінің шекті нүктесі; $P_{ин}$ - шекті қысым; 4-жоғарғы шекті қысым аймағы.

Құбылысты талдауға көшпес бұрын студент термодинамиканың сәйкес тарауларынан алған біліміне сенімді болуы қажет.

Су буы күйінің өзгеру құбылысының есебі су және су буының термодинамикалық қасиетінің немесе термодинамикалық диаграмма кестесінің көмегімен жүргізілуі мүмкін.



6.1 сурет

6.2 Бу күйінің өзгеру құбылысын су және су буының термодинамикалық қасиетінің кестесінің көмегімен есептеудің жалпы әдісі

Құбылыстың сипаты, оның өту шарты, талдау мақсаты және ұзындығы құбылыс жүретін қондарғылардың жұмысын талдаудың нәтижесінде көрсетіледі. Осылай берілуі мүмкін және бастапқы екі және соңғы бір көрсеткіші тәжірибелі түрде анықталуы керек. Егер бу дымқыл қаныққан болса, онда берілген қысым және температура бірге оның күйін анықтамайды, бұл жағдайда бұл көрсеткіштері берілуі мүмкін, мысалы: қысым мен меншікті көлем, температура және энтальпия немесе көрсеткіштің біреуі және будың құрғақтық дәрежесі құбылысты жүргізетін бу мөлшері оның салмағымен (салмақтық шығын) және бастапқы көлемі (көлемдік шығын) соңғы және басқа күйде [1].

6.2.1 Бастапқы (бірінші) күйдің көрсеткішін анықтау.

Бастапқы қысым p_1 және температура t_1 , осы көрсеткіштің біреуі басқалармен бірігіп – меншікте көлеммен v_1 , энтальпиямен h , немесе энтропиямен S_1 берілген деп алып көрейік. Онда қысым p_1 немесе температура t_1 олардың шекті нүктесіндегі мағынасымен салыстырылуы керек. Егер $p_1 > p_{ui}$ немесе $t_1 > t_{ui}$ (немесе екеуінің көрсеткіштері шектіден үлкен болса), онда бу күйі аса қыздырылған бу аймағында немесе жоғары шекті қысым аймағында және жетіспейтін көрсеткіштерін екі берілген көрсеткіші бойынша аса қыздырылған будың термодинамикалық қасиетінің кестесінен табылады.

Егер $p_I < p_{II}$ (немесе $t_I < t_{II}$), онда p_I бойынша (немесе t_I) фазалық өту шекарасындағы берілген екінші көрсеткішті анықтауға болады, яғни бұл көрсеткіштің қайнаған су және құрғақ қаныққан бу мағынасын берілген биіктік бойынша салыстырылуы қажет.

Салыстыру нәтижесінде келесі жағдайлар болуы мүмкін:

А) Екінші көрсеткіштің ұзындығы оның құрғақ қаныққан бу мағынасынан үлкен болуы. Бастапқы күйінде будың аса қыздырылған және жетіспейтін көрсеткіштерін аса қыздырылған бу кестесінен анықталады.

Б) Екінші көрсеткіштің ұзындығы қайнаған судың мағынасынан кем; бастапқы күй – су қайнағанға дейін қыздырылмаған және көрсеткіштерін су және дымқыл бу кестесінен анықталады.

В) Екінші көрсеткіштің биіктігі қайнаған су және құрғақ қаныққан будың мағынасына тең. Бастапқы күйі қайнаған су және дымқыл буға арналған кестеден анықтайды.

Г) Екінші көрсеткіш құрғақ қаныққан бу мағынасынан және қайнаған су мағынасынан кем; бастапқы күйі – дымқыл қаныққан бу. Мысалы: p_I қысым және меншікті көлем v_I берілген. Су және дымқыл бу кестесінде p_I бойынша v'_I және v''_I -ді анықтау керек. Егер салыстыру нәтижесінде $v' < v_{II} < v''_I$ болса, онда бастапқы күйінде – дымқыл қаныққан бу. Бұл будың құрғақтық дәрежесі келесі қатынаспен анықтауға болады

$$x_1 = \frac{v_1 - v'_1}{v''_1 - v'_1}.$$

Су және дымқыл бу кестесінде p_I мағынасы бойынша бастапқы күйдің температурасының биіктігінен $t_I = t_c$ және фазалық өту шекарасындағы –

h''_I, s''_I, v''_I анықтау қажет. Бұл есептеуден кейін бастапқы күйдің жетіспейтін көрсеткіштерін осы қатынаспен

$$h_1 = h''_1 \cdot x_1 + h'_1(1 - x_1),$$

$$s_1 = s''_1 \cdot x_1 + s'_1(1 - x_1),$$

$$u_1 = h_1 - p_1 v_1$$

Осы сияқты бастапқы екі көрсеткіштің бірігуімен дымқыл қаныққан будың көрсеткіштерін анықтау керек. Есептің қорытындысынан қысым және температура екеуі бірдей құрғақ қаныққан бу күйін анықтамайтындығын байқалады. Қысым және температурамен қайнағанға дейін ысымаған су күйін, аса қыздырылған бу және жоғары шекті қысымдағы будың күйін анықталады. Осы жағдайда жетіспейтін көрсеткіштерді аса қыздырылған бу кестесінен анықталады. Егер $p_I < p_{II}$, онда $t_I > t_{sI}$ – қануға температурасы, p_I - қысымғы сәйкес бастапқы күйі – аса қыздырылған бу, ал егер $t_I < t_{sI}$ – су қайнағанға дейін қыздырылмаған болып тұрады.

6.2.2 Күйдің соңғы (екінші) көрсеткішін анықтау

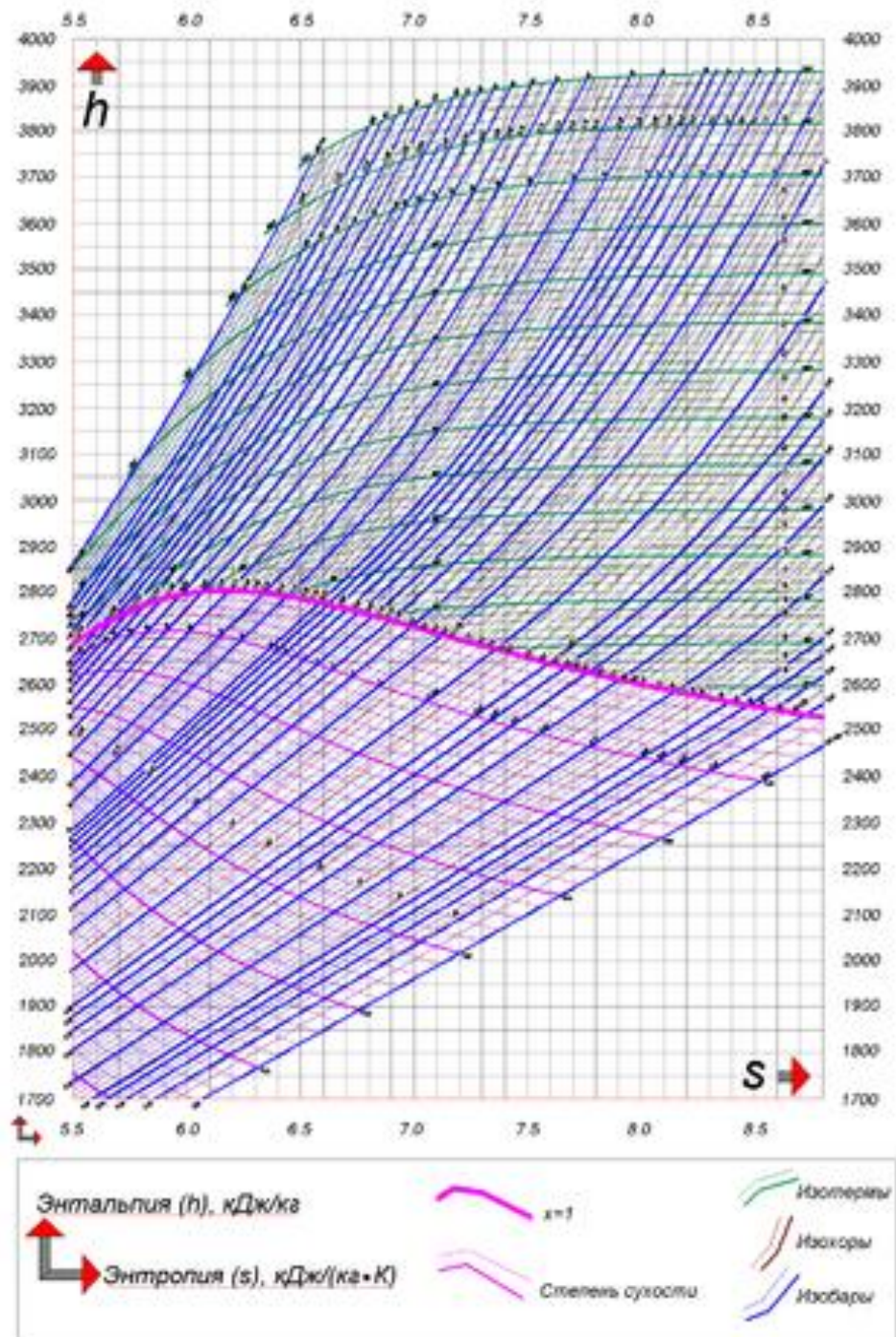
Негізгі құбылыстарды талдау кезінде (көлем тұрақты, қысым тұрақты, температура тұрақты немесе изоэтропты) соңғы тұрақтылығы құбылыстың сипаттайтын көрсеткіштерінің біреуі бастапқы немесе бастапқы күйді анықтау кезінде табылған көрсеткішке тең. Соңғы күйді анықтау үшін тағы бір көрсеткіш берілуі қажет. Осы екі көрсеткішті қолданып, құбылыстың соңында жұмысшы дененің агрегаттық күйін және жетіспейтін көрсеткіштерін бастапқы күйде көрсетілгендей анықтауға болады [1].

3 кесте - 3- ші жұмысқа тапсырма нұсқалары

Нұсқалар №	Бу көрсеткіштері															жауаптары			
	Бастапқы							Соңғы							Құб.сип-ры	Δ_u	Δ_h	l	q
	P_1 , МПа	t_1 , °C	v_1 , м³/кг	S_1 , кДж/кг	x_1	h_1 , кДж/кг	V_1 , м³	P_2 , МПа	t_2 , °C	v_2 , м³/кг	S_2 , кДж/кг	x_2	h_2 , кДж/кг	V_2 , м³		кДж/кг			
1	4	300					12							1	p=const				
2	2		0,08				12	4							v=const				
3	0,5	180					60						2500		t=const				
4	2	350					14	0,05							dq=0				
5	13,0				0,98				560						p=const				
6	0,01	80							20						ыдыс жабық				
7	0,2	200					10			0,1					t=const				
8	13	560						0,004							s=const				
9	0,5	280					9							6	p=const				
10	0,1				0,95			0,18							ыдыс жабық				
11	0,2	170					0,5						2240		t=const				
12	0,3		0,5						400						s=const				
13		180			0,92				475						p=const				
14	0,4	200					7	0,3							V=const				
15	0,1				0,85		9	0,03							t=const				
16	1,1	450						0,014							dq=const				
17	3			6,5					570						p=const				
18		100			0,7								2500		v=const				
19			5	6,5				0,03	100						t=const				

20	0,2				0,9				600							dg=0				
21		100		6,5							8,5					p=const				
22	10					3600						0,7				v=const				
23		300		8,5								0,8				t=const				
24			100	0,9									2500			s=const				
25	100	570						0,0 4								s=const				

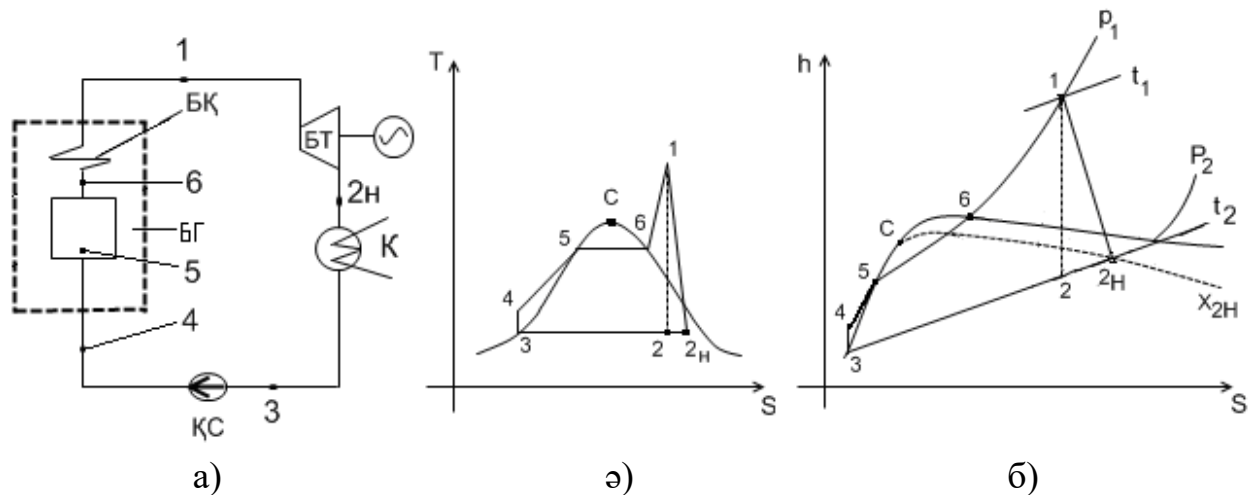
h, s - диаграмма воды и водяного пара



7. №4 есептік-сызба жұмыс. Бүкүшті циклды есептеу

1. Ренкин циклін есептеу.

1) Су буымен жұмыс істейтін бутурбиналы қондырғыда Ренкин циклі жүзеге асырылады. (7.1 сурет қара).



7.1 сурет - Су буымен жұмыс істейтін бутурбиналы қондырғыда Ренкин циклі

Бугенераторынан (БГ) алынған аса қыздырылған бу p_1 , t_1 параметерлерімен (1-нүкте) бу турбинасында (БТ) ұлғайып, пайдалы жұмыс істейдә. Бу турбинасында $P_2 = P_{2H}$ қысымына дейін ұлғайған бу «2_H» күйінде P_{2H} , X_{2H} параметрлерімен конденсаторға (К) кіреді. Конденсаторда суық көзге (салқындатушы суға) жылу беру себебінен конденсацияланып, су түрінде (3-нүкте) қоректік сорғы (ҚС) арқылы бу генераторына қайта беріледі (мұндағы «3-4» құбылысы суды қоректік сорғыда P_1 қысымына дейін сығу жұмысы, аз болғандықтан оны ескермеуге болады).

Бу генераторында қоректік су P_1 қысымындағы қайнау температурасына дейін қыздырылып (4-5 құбылысы, 5-нүкте), одан ары құрғақ буға айналады (5-6 құбылысы, 6-нүкте). Содан кейін бу қыздырғышқа (БҚ) беріліп, ол жерде аса қыздырылған бу күйіне (1-нүкте) жеткенге дейін жылу беріледі (6-1 құбылысы), цикл тұйықталады.

Анықтау керек:

1) Циклдың жұмыстық дененің (су) параметрлерін (P , t , v , h , s) T - S немесе h - s диаграммасы мен су және су буының кестелері көмегімен анықтап кесте түрінде келтіру (ескерту: сорғы жұмысын ескермеуге болады, демек 4-нүктедегі параметрлер 3-нүктемен бірдей).

2) Циклді T - S және h - s диаграммалында бейнелеу.

3) Табылған энтальпия мәндері бойынша қайтымды және қайтымсыз циклдердің термиялық ПӘК-терін есептеу.

4) Бу турбинасының салыстырмалы ішкі п.э.к – ін есептеу.

Әр топ және вариант үшін берілгендерді 7.1 кестесінен алынады [1].

7.1 кесте - 4-ші ЕСЖ Нұсқалары

Тапсырманың нұсқасы					P ₁ МПа	P ₀₁ МПа	D ₀₁ т/ч	D ₀₂ т/ч	N ₃ МВт
Нұсқалар №	Топтар								
	1	2	3	4					
	t ₁ , °C	t ₁ , °C	t ₁ , °C	t ₁ , °C					
1	560	555	550	545	23,5	4,0	400	200	800
2	560	550	540	530	23,0	3,5	300	150	500
3	560	550	540	530	22,0	3,5	200	100	300
4	560	550	540	530	21,0	3,0	110	60	200
5	555	550	540	530	20,0	2,5	90	50	150
6	560	550	540	530	19,0	1,5	80	40	100
7	550	540	530	520	18,0	1,4	40	15	50
8	550	540	530	520	17,0	3,5	200	100	300
9	550	540	530	520	16,0	3,5	210	110	300
10	550	540	530	520	15,0	3,0	110	50	200
11	550	540	530	520	14,0	3,0	110	60	200
12	540	530	520	510	13,0	3,0	120	60	250
13	540	530	520	510	12,0	2,0	120	60	175
14	540	530	520	510	11,0	2,0	110	60	150
15	540	530	520	510	10,0	1,5	110	50	125
16	540	530	520	510	9,0	1,5	90	40	100
17	540	530	520	510	8,0	1,8	80	40	90
18	520	510	500	490	7,0	1,6	80	40	75
19	500	490	480	470	6,0	1,5	45	20	50
20	490	480	470	460	5,0	1,5	20	15	20
21	470	460	450	440	4,0	1,4	12	6	15
22	450	440	430	410	3,5	1,3	10	5	10
23	445	435	425	415	13	3,0	100	50	200
24	450	440	430	420	12	2,5	100	40	180
25	450	440	430	420	11	2,0	90	40	160
26	440	430	420	410	10	2,0	80	40	140
27	430	420	410	400	9	1,5	80	40	100
28	420	410	400	390	8	1,5	70	30	80

$P_1=(13-24)\text{МПа}$; $P_2=0,004\text{МПа}$; $\eta_{\text{эм}} = 0,95 \div 0,98$; $x_{2\text{H}}=0,84-0,88$.

$P_1=(3.5-12)\text{МПа}$; $P_2=0,003\text{МПа}$; $\eta_{\text{эм}} = 0,92 \div 0,95$; $x_{2\text{H}}=0,84-0,88$.

$P_{02}=0,12\text{ МПа}$ (барлық варианттар үшін); $Q_{\text{H}}^{\text{P}}=29,0\text{ МДж/кг}$.

Есептеу үлгісі.

Берілгені: $P_1=19,0\text{ МПа}$; $t_1=550\text{ °C}$; $P_2=0,004\text{ МПа}$; $x_{2\text{H}}=0,85$.

1. “1”-нүкте “h-S” – диаграммасында P_1 изобарасының t_1 изотермасымен

қиылысу нүктесінде анықталады; осы нүктенің ординатасы мен абсциссасы бойынша сәйкес энтальпия мен энтропиясы табылады: $h_1=3425\text{ кДж/кг}$; $S_1=6,37\text{ кДж/кг}$. “1”-нүктесі арқылы өтетін изохараның (штрих-пунктирлі қисық) мәні меншікті көлемді анықтайды $v_1= 0,018\text{ м}^3/\text{кг}$. “1”-

нүктеде бу аса қыздырылған, сызықтан құрғақтың дәрежесі x анықталмайды “Т-S”- диаграммасында энтальпия h_1 “1”-нүктесі арқылы өтетін изоэнтальпия бойынша анықтайды.

2. “2”-нүкте $S_2=S_1$ изоэнтропасының P_2 изобарасымен қиылысу нүктесіне

сәйкес келеді, себебі “1-2” құбылысы қайтымды Ренкин циклінің изоэнтропты құбылыс. Энтальпия, энтропия және меншікті көлем алдыңғы нүктедегідей табылады: $h_2=1925$ кДж/кг; $S_2=6,37$ кДж/кг; $v_2=29$ м³/кг. t_2 температурасы мен x_2 құрғақтық дәрежесі “2” нүкте арқылы өтетін изотерма (ылғалы бу аймағында изотермалар изобаралармен бірге өтеді) мен тұрақты құрғақтық қисығы бойынша анықталады. $T_2=27^\circ\text{C}$ ($T_2=t_2+273=300\text{K}$), $x_2=0,74$. “Т-3” диаграммасында да параметрлер осылайша анықталады

3. Қайтымсыз Ренкин циклі үшін нақты “2н” нүктесін $P_{2н}=P_2$ изобарасының

$x_{2н}=0,85$ тұрақты құрғақтың дәрежесінің сызығымен қиылысу нүктесінде анықтаймыз. Бұл нүктеде $h_{2н}=2185$ кДж/кг $S_{2н}=7,27$ кДж/кг; $v_{2н}=37$ м³/кг; ал температура $t_{2н}=t_2=27^\circ\text{C}$, себебі 2 және 2н нүктелері ылғалды бу аймағында бір изобара мен изотерманың бойында жатыр.

4. “3” нүктесін “h-S” диаграммасы бойынша таба алмаймыз, себебі онда ылғалды бу аймағы мен сұйық фазаның арасындағы төменгі шекаралық ($x=0$) көрсетілмеген. Сол үшін 3 нүктесі “Т-S” диаграммасында t_2 изотермасының (немесе P_2 изобарасының) төменгі (сол жақ) шекаралық қисықпен ($x_3=0$) қиылысу нүктесінде табылады. Бұл нүктеде $S_3=0,42$ кДж/кг·К; $h_3=121,4$ кДж/кг·К; $v_3\approx 0,001$ м³/кг. (3 нүктесінің параметрлерін су және су буының термодинамикалық қасиеттерінің кестесі бойынша да қарауға болады).

5. “4” нүктесінің параметрлерін анықтамауымызға болады, себебі жоғарыда ескерткеніміздей, біз сорғы жұмысын ескермейміз және “4” нүктесінің параметрлері (қысымнан басқа) “3” нүктесінің параметрлеріне тең деп аламыз.

6. “5” нүктесі де тек “Т-S” диаграммасы бойынша $P_5=P_1$ изобарасының сол

жақ шекаралық қисықпен қиылысу нүктесінде анықталады: $x_5=0$; $S_5=3,94$ кДж/кг·К; $h_5=1778$ кДж/кг; $v_5=0,0019$ м³/кг; $t_5=361^\circ\text{C}$ ($T_5=t_5+273=634^\circ\text{K}$). “6”-нүкте “h-S” және “Т-S” диаграммасында $P_6=P_1$ изобарасының немесе $t_6=t_5$ изотермасының жоғарғы (оң жақ) шекаралық қисықпен қиылысу нүктесінде анықталады: $h_6=2470$ кДж/кг; $S_6=5,03$ кДж/кг·К; $v_6=0,0067$ м³/кг; $t_6=t_5=361^\circ\text{C}$ ($T_6=634^\circ\text{K}$).

7. “6”-нүкте “h-S” және “Т-S” диаграммасында $P_6=P_1$ изобарасының немесе $t_6=t_5$ изотермасының жоғарғы (оң жақ) шекаралық қисықпен қиылысу нүктесінде анықталады : $h_6=2470$ кДж/кг; $S_6=5,03$ кДж/кг·К; $v_6=0,0067$ м³/кг; $t_6=t_5=361^\circ\text{C}$ ($T_6=634^\circ\text{K}$).

Осылай циклдің барлық нүктелерінің параметрлері анықталып кестеге толтырылады, ал цикл таза қағазда “h-S” және “Т-S” диаграммасында салынады.

8. Табылған энтальпия мәндері бойынша қайтымды (1-2-3-4-5-6-1) және қайтымсыз (1-2_н-3-4-5-6-1) циклдердің термиялық ПӘК-терін анықтау (сорғы жұмысын ескермейміз).

Қайтымды циклдің термиялық ПӘК-і:

$$\eta_t^{К-бл} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} = \frac{3425 - 1925}{3425 - 121,4} = \frac{1500}{3303,6} = 0,45.$$

Қайтымсыз циклдің термиялық пәк-і:

$$\eta_t^{К-сыз} = \frac{h_1 - h_{2н}}{h_1 - h_3} = \frac{3425 - 2185}{3425 - 121,4} = \frac{1240}{3303,6} = 0,37.$$

Көріп отырғанымыздай, қайтымды циклдің термиялық пәкі қайтымсыз циклдегіден 21%-ға артық [1].

Бу турбинасының салыстырмалы ішкі ПӘК-і:

$$\eta_{oi} = \frac{h_1 - h_{2н}}{h_1 - h_2} = \frac{3425 - 2185}{3425 - 1925} = 0,82.$$

II. Регенеративті жылуландырғыш циклді есептеу

Бу турбины жылуқушті қондырғының термиялық пайдалы әсер коэффициентін арттыру үшін жылуды регенерациялау қолданады.

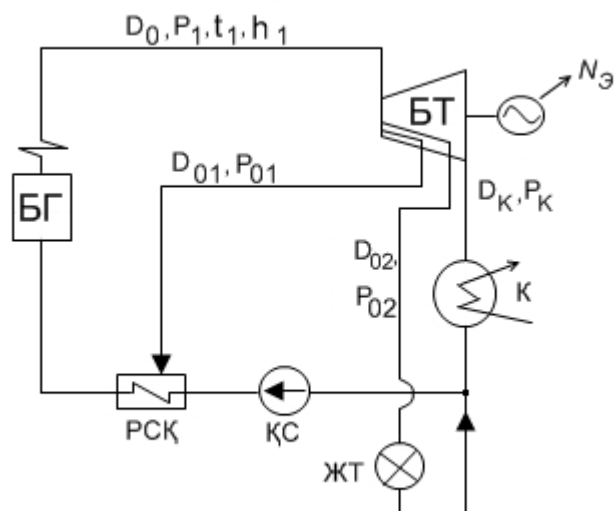
Сонымен қатар Ренкин цикліндегі конденсаторға салқындатушы суға салқын көзге беріліп, жоғалатын жылу шығынын азайту үшін жылуландырғыш циклімен жұмыс істейтін жылуэлектр орталығы (ЖЭО) 7.2- суретінде көрсетілген.

Регенеративті су қыздырғышқа (РСК) және жылу тұтынушыға (ЖТ) бу турбинасында пайдалы ұлғаю жұмысын жасап, потенциалы азайған бу арнайы турбина алымдарынан беріледі: шығымдары Д₀₁ және Д₀₂, қысымдары Р₀₁,

Р₀₂. РСК араластырушы түрінде (демек, конденсат пайда болмайды) орындалған, ал жылу тұтынушыдан конденсат толығымен циклге қайта оралады.

ЖЭО электр қуаты N_э, бастапқы параметрлері (Р₁, t₁) мен алымдағы параметрлері Д₀₁, Р₀₁, Д₀₂, Р₀₂, 7.1 кестесінде көрсетілген.

ЖЭО-ның жылулық жүктемесін, жылу пайдалану коэффициентін отын шығымен тауып, оның мәнін тұтынушылар электр және жылу энергияларымен бөлек қамтамасыз етілген жағдайдағы мәндерімен салыстыру керек. Бұл жағдайда электр станциясы КЭС мен ЖЭО-ның бу параметрлері бірдей, ал жылу энергиясы бөлек қазандықтан беріледі деп аламыз.



7.2 сурет - Жылуландырғыш циклімен жұмыс істейтін жылуэлектр орталығы (ЖЭО)

1.Регенеративті, жылуландырғыш және конденсациялық бу ағындарының бу турбинасында өндірген пайдалы қуаттары:

$$\begin{aligned}
 N_p &= D_{01}(h_1 - h_{01}) \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_{ЭМ} = \\
 &= \frac{80}{3,6} \cdot (3425 - 2760) \cdot 0,77 = 11,378 \text{ MBm} ; \\
 N_{жс} &= D_{02}(h_1 - h_{02}) \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_{ЭМ} ; \\
 &= \frac{40}{3,6} \cdot (3425 - 2335) \cdot 0,77 = 9,326 \text{ MBm} \\
 N_k &= D_k(h_1 - h_k) \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_{ЭМ} .
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

мұндағы: h_{01} , h_{02} , h_k — алымдардағы және конденсатордағы бу энтальпиясы.

Алымдардағы энтальпия P_{01} және P_{02} изобараларының нақты ұлғаю құбылысымен қиылысуында анықталады.

$$\text{Егер} \quad N_p + N_{жс} + N_k = N_{э}, \tag{4.2}$$

екенін ескерсек, конденсациялық ағынның өндіретін пайдалы электр қуаты

$$N_k = N_{э} - N_p - N_{жс} = 100 - (11,378 + 9,326) = 79,296 \text{ MBm}$$

тең болады.

Олай болса, конденсатор арқылы өтетін бу шығыны

$$D_k = \frac{N_k}{(h_1 - h_k) \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_{ЭМ}} = \frac{79,296}{(3415 - 1925) \cdot 0,77} = 69,12 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot 3,6 = 248,8 \frac{\text{т}}{\text{са}} . \tag{4.3}$$

2. Циклдегі жұмыстық денеге бу генераторында берілген жылу мөлшері:

$$Q_1 = D_{01}(h_1 - h'_{01}) + D_{02}(h_1 - h'_{02}) + D_k(h_1 - h'_k) =$$

$$= \frac{80}{3,6} \cdot (3415 - 844,7) + \frac{40}{3,6} \cdot (3415 - 439,4) + \frac{248,8}{3,6} \cdot (3415 - 121,4) = 318829 \left[\frac{\text{кДж}}{\text{с}} \right],$$

мұндағы:

D_{01} , D_{02} , D_k - регенерация мен жылуландырғыш алымдардағы және конденсатор арқылы бу шығымдары, кг/с;

$h'_{01} = 844,7$; $h'_{02} = 439,4$; $h'_k = 121,4$ [кДж/кг·К] - алымдардағы және конденсатордағы қысымдар бойынша төменгі шекаралық қисықтағы энтальпиялар $h'_k = h_3$.

Бұл жылу ЖЭО-ның бу генераторында $B_{ЖЭО}$ отын мөлшерінің жануы кезінде алынады

$$Q_1 = B_{ЖЭО} \cdot Q_H^P \cdot \eta_{БГ}, \quad (4.5)$$

демек бұл жерден біз $B_{ЖЭО}$ мәнін табу керек:

$$B_{ЖЭО} = \frac{Q_1}{Q_H^P \cdot \eta_{БГ}},$$

$$= \frac{318829}{29000 \cdot 0,9} = 12,216 \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right] = 43,976 \left[\frac{\text{т}}{\text{са}} \right],$$

мұндағы: $\eta_{БГ}$ —бу генераторының ПӘК-і, ($\eta_{БГ} \approx 0,9$).

3. Циклдегі жұмыстық дененің бу турбинасының алымдарындағы жылуын шартты түрде регенерациялық, жылуландырушы және конденсатордағы ағындарының жылуларына бөлуге болады [1]:

$$Q_p = D_{01}(h_{01} - h'_{01}); \frac{80}{3,6} \cdot (2790,4 - 844,7) = 43237,8 \left[\frac{\text{кДж}}{\text{с}} \right],$$

$$Q_{жс} = D_{02}(h_{02} - h'_{02}); \frac{40}{3,6} \cdot (2683,8 - 439,4) = 24937,8 \left[\frac{\text{кДж}}{\text{с}} \right], \quad (4.6)$$

$$Q_k = D_k(h_{2H} - h_3); \frac{401,25}{3,6} \cdot (2554,1 - 121,4) = 271144,7 \left[\frac{\text{кДж}}{\text{с}} \right].$$

Егер жылуландыруға керек жылуды $Q_{ж}$ бөлек қазандықта өндірсек ондағы жұмсалатын отын шығыны

$$B_{каз} = \frac{Q_{жс}}{Q_H^P \cdot \eta_{каз}} = \frac{24937,8}{29000 \cdot 0,9} = 0,955 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 3,45 \left[\frac{\text{т}}{\text{сағ}} \right]. \quad (4.7)$$

Ал тек конденсациялық электр станциясында өндірілетін электр энергиясы

$$N_{э} = B_{кэс} \cdot Q_H^P \cdot \eta_t \cdot \eta_{БГ} \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_{ЭМ}, \quad (4.8)$$

оны өндіруге жұмсалған отын шығыны

$$B_{KЭС} = \frac{100 \cdot 10^3}{29000 \cdot 0,37 \cdot 0,9 \cdot 0,77} = 13,44 \frac{K\mathcal{E}}{c} \cdot 3,6 = 48,38 \frac{T}{ca\mathcal{T}} .$$

Тұтынушыларды электр және жылу энергияларымен бөлек қамтамасыз еткен кездегі жалпы отын шығыны

$$\begin{aligned} B_{\text{бол}} &= B_{KЭС} + B_{\text{каз}} = \\ &= 48,38 + 3,45 = 51,83 \text{ [T/ca\mathcal{T}]} . \end{aligned} \quad (4.9)$$

Табылған B_6 мәнін орталықтан қамтамасыз еткен жағдайдағы $B_{\text{жэо}}$ мәнімен салыстырғанда:

$$43,976 = B_{\text{жэо}} < B_{\text{бол}} = 51,83$$

демек, жылу және электр энергияларын ЖЭО-да өндірген тиімді.

4. ЖЭО-дағы отынның жылуын пайдалану коэффициенті

$$K_{\Pi} = \frac{N_{\text{э}} + Q_{\text{ж}}}{B_{\text{жэо}} \cdot Q_{\text{н}}} . \quad (4.10)$$

5. ЖЭО-ның эксергиялық ПӘК-і:

$$\eta_{\text{жэо}}^{\text{экс}} = \frac{N_{\text{э}} + E_Q}{E_{\text{отын}}} , \quad (4.11)$$

мұндағы:

E_Q - жіберілген жылу мөлшерінің ($Q_{\text{ж}}$) эксергиясы;

$E_{\text{отын}}$ - жанған отынның эксергиясы [1].

Әдебиеттер тізімі

- 1 Р. А. Мұсабеков, В. О. Байбекова Техникалық термодинамика. Жылуқуштік айналымдарды және термодинамикалық құбылыстарды есептеу. 050717 - Жылуэнергетика мамандықтарының барлық оқыту түрлерінің студенттері үшін есептік-сызба жұмыстарын орындауға арналған әдістемелік нұсқау - Алматы: АЭЖБУ, 2011. – 34 б.
- 2 Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика.- М.: Изд. 4-е, переработанное. Энергоатомиздат, 1983, 416с.
- 3 Мырзахметов Б. А., Сазаев Ж. О. Техникалық термодинамика: Оқу құралы – Алматы: ҚазҰТУ, 2003 - 138 б.
- 4 Әділбеков М. Ә. Жылутехника: ЖОО студ. арн. оқу құралы. – Алматы, 2005, 246 бет.
- 5 Андрианова Т.Н., Дзампов Б.В., Зубарев В.Н., Ремизов С.А. Сборник задач по технической термодинамике. –М.: Энергоиздат, 1981.
- 6 Қуатбеков М. Қ., Ақынбеков Е. Қ. Техникалық термодинамика: ЖОО студ. арн. оқулық. – Алматы: Рауан, 1995 - 215 б.
- 7 Юдаев Б.Н. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче. –М.: Высш. шк., 1968.
- 8 Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. –М.: Энергоатомиздат, 1984.
- 9 Сазаев Ж.О. Техническая термодинамика. Расчет термодинамических циклов. – Алматы: АИЭС, 2000.
- 10 Александров А. А. Термодинамические основы циклов тепло-энергетических установок: Учебное пособие для вузов.- М.: Изд. МЭИ, 2004.- 158 б.

Мұсабеков Расулбек Ақылбекович
Байбекова Вера Оразалиевна

Техникалық термодинамика.
Жылуқуштік айналымдарды және термодинамикалық
құбылыстарды есептеу

6B07103 - Жылуэнергетика мамандықтарының барлық оқу түрлерінің
студенттері үшін есептік-сызба жұмыстарын орындауға арналған
әдістемелік нұсқау

Стандарттау бойынша маман:
Редактор :

Ануарбек Ж.А.
Жанабаева Е.Б.

Басылымға қол қойылды 18.11.2025
Таралымы 50 дана
Көлемі 2,4 оқу-бас.ә.

Пішімі 60x84 1/16
Баспаханалық қағаз № 1
Тапсырыс .Бағасы1200 теңге.

«Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс
университеті»коммерциялық емес акционерлік қоғамының
көшірмелі-көбейткіш бюросы.
050013, Алматы, Байтурсынұлы көшесі, 126/1